



UNIVERSITAS NEGERI PADANG

**PENGARUH PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI DAN
BUBUK TANAH LIAT SEBAGAI MEDIA PENDINGIN PADA
PROSES POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT)
TERHADAP KEKERASAN DAN KETANGGUHAN IMPAK
HASIL LAS SMAW PADA MATERIAL BAJA SS400**

TUGAS AKHIR

**ANGGA HERMAWANSYAH
21338021**

**PROGRAM STUDI S1 TEKNIK MESIN
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
PADANG
2026**

PERSETUJUAN TUGAS AKHIR

Judul : Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Bubuk Tanah Liat sebagai Media Pendingin pada Proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap Kekerasan dan Ketangguhan Impak Hasil Las SMAW pada Material Baja SS400

Nama : Angga Hermawansyah

NIM : 21338021

Tahun Masuk : 2021

Program Studi : S1 Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Padang, 5 Mei 2026

Disetujui Oleh:

Koordinator Prodi S1 Teknik Mesin



Yolli Fernanda, S.T., M.T., Ph.D.Eng.
NIP. 19760706 200312 1 001

Dosen Pembimbing,



Zainal Abadi, S.Pd., M.Eng.
NIP. 19870612 201903 1 006

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

*Dinyatakan lulus setelah mempertahankan tugas akhir di depan tim penguji
Program Studi SI Teknik Mesin, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik,
Universitas Negeri Padang*

Judul : Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Bubuk Tanah Liat
sebagai Media Pendingin pada Proses Post Weld Heat
Treatment (PWHT) terhadap Kekerasan dan Ketangguhan
Impak Hasil Las SMAW pada Material Baja SS400

Nama : Angga Hermawansyah

NIM : 21338021

Tahun Masuk : 2021

Program Studi : SI Teknik Mesin

Jurusan : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Padang, 13 Mei 2026

Tim Penguji:

Nama

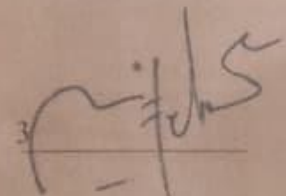
1. Ketua : Zainal Abadi, S.Pd., M.Eng.



2. Anggota : Delima Yanti Sari, S.T., M.T., Ph.D.



3. Anggota : Rifelino, S.Pd., M.T.



PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulisan saya, tugas akhir dengan judul “Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Bubuk Tanah Liat sebagai Media Pendingin pada Proses *Post Weld Heat Treatment* (PWHT) terhadap Kekerasan dan Ketangguhan Impak Hasil Las SMAW pada Material Baja SS400” adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik, baik di Universitas Negeri Padang, maupun di Perguruan Tinggi Lainnya.
2. Karya tulis ini murni gagasan, penilaian, dan rumusan saya sendiri, tanpa bantuan tidak sah dari pihak lain, kecuali arahan dari tim pembimbing dan penguji.
3. Di dalam karya tulis ini tidak terdapat hasil karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali dikutip secara tertulis dengan jelas dan dicantumkan pada daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila ada dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran pernyataan ini maka saya bersedia menerima sanksi akademik, berupa pencabutan gelar yang telah saya peroleh karena karya tulis ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma dan ketentuan hukum yang berlaku.

Padang, 13 Mei 2026
Saya yang menyatakan,



Angga Hermawansyah
NIM 21338021

ABSTRAK

Angga Hermawansyah, 2026. Pengaruh Penggunaan Abu Sekam Padi dan Bubuk Tanah Liat sebagai Media Pendingin pada Proses Post Weld Heat Treatment (PWHT) terhadap Kekerasan dan Ketangguhan Impak Hasil Las SMAW pada Material Baja SS400. Tugas Akhir, Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Padang

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi media pendingin pada proses Post Weld Heat Treatment (PWHT) terhadap sifat mekanik hasil las SMAW pada baja SS400. Permasalahan yang dikaji adalah bagaimana media pendingin alternatif memengaruhi nilai kekerasan dan ketangguhan impak, serta hubungan keduanya setelah perlakuan panas.

Penelitian dilakukan dengan proses pengelasan SMAW yang dilanjutkan dengan PWHT, menggunakan variasi media pendingin berupa abu sekam padi, tanah liat, dan udara. Pengujian yang dilakukan meliputi uji kekerasan dan ketangguhan impak, kemudian data dianalisis menggunakan One-Way ANOVA dan uji lanjut Tukey.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa pendinginan udara menghasilkan kekerasan tertinggi hingga 80,10 HRB pada *weld metal*, sedangkan media abu sekam padi dan tanah liat menghasilkan nilai yang lebih rendah. Sebaliknya, nilai ketangguhan impak tertinggi diperoleh pada tanah liat sebesar 1,175 J/mm², diikuti abu sekam padi sebesar 1,107 J/mm², dan terendah pada udara sebesar 0,845 J/mm². Hasil analisis menunjukkan bahwa perbedaan media pendingin berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik.

Dapat disimpulkan bahwa media pendingin pasca PWHT berperan dalam menentukan keseimbangan antara kekerasan dan ketangguhan impak sambungan las. Pendinginan pasca PWHT yang lebih lambat cenderung meningkatkan ketangguhan, sedangkan pendinginan cepat meningkatkan kekerasan. Hasil ini dapat dijadikan pertimbangan dalam pemilihan metode pendinginan pada proses PWHT untuk meningkatkan kualitas sambungan las.

Kata Kunci: SMAW, PWHT, media pendingin, kekerasan, ketangguhan impak, SS400.

KATA PENGANTAR



Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala Puji dan syukur kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga peneliti dapat menyelesaikan Tugas Akhir dengan judul “PENGARUH PENGGUNAAN ABU SEKAM PADI DAN BUBUK TANAH LIAT SEBAGAI MEDIA PENDINGIN PADA PROSES POST WELD HEAT TREATMENT (PWHT) TERHADAP KEKERASAN DAN KETANGGUHAN IMPAK HASIL LAS SMAW PADA MATERIAL BAJA SS400”.

Shalawat beserta salam semoga selalu dilimpahkan oleh Allah Subhanahu Wa Ta'ala kepada junjungan umat islam, Nabi Muhammad Shallallahu Alaihi Wasallam yang telah membawa umat manusia dari zaman jahiliyah menuju zaman yang penuh dengan cahaya ilmu pengetahuan.

Dalam menyusun Tugas Akhir ini penulis banyak memperoleh bimbingan, saran, motivasi dan bantuan dari berbagai pihak baik secara langsung maupun tidak langsung. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Orang tua, dan keluarga yang telah memberikan dorongan, nasehat, semangat, doa dan kasih sayang yang begitu besar sehingga penulis dapat melakukan penyusunan Tugas Akhir dengan penuh semangat dan sungguh-sungguh.

2. Bapak Dr. Eko Indrawan, S.T., M.Pd. selaku Ketua Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
3. Bapak Yolli Fernanda, S.T., M.T., Ph.D.Eng. Selaku Koordinator Prodi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Padang.
4. Bapak Zainal Abadi, S.Pd., M.Eng. Selaku dosen pembimbing, yang telah memberikan bimbingan, saran-sarann dan mengarahkan penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Ibu Delima Yanti Sari, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Peninjau dan Penguji 1 (satu) pada Tugas Akhir ini.
6. Bapak Rifelino, S.Pd., M.T. selaku Dosen Peninjau dan Penguji 2 (dua) pada Tugas Akhir ini, sekaligus Dosen Pembimbing Akademik.
7. Bapak dan ibu dosen beserta staf administrasi Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang.
8. Orang spesial penulis, Adhwaa' Ahnaf Umadila Setiawan yang telah menemani dan memberikan kritik, motivasi, do'a, serta selalu mendengarkan keluh kesah penulis.
9. Teman-teman seperjuangan angkatan 2021 yang selalu memberikan semangat serta dukungan kepada penulis.
10. Semua pihak yang telah membantu dan memberikan dukungan selama penulisan Proposal Tugas Akhir ini.

Semoga Allah Subhanahu Wa Ta'ala memberikan balasan yang baik kepada semua pihak yang telah membantu penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini. Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk perbaikan Tugas

Akhir ini kedepannya. Semoga Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca

Padang, 13 Mei 2026

Angga Hermawansyah

DAFTAR ISI

PERSETUJUAN TUGAS AKHIR	ii
PENGESAHAN TUGAS AKHIR.....	iii
PERNYATAAN.....	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vi
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
A. Latar belakang masalah.....	1
B. Identifikasi masalah	8
C. Batasan masalah.....	9
D. Rumusan masalah.....	9
E. Tujuan penelitian.....	9
F. Manfaat penelitian.....	9
BAB II KAJIAN TEORI	11
A. Definisi Pengelasan.....	11
B. Pengelasan SMAW (<i>Shielded Metal Arc Welding</i>)	12
1. Perlengkapan dan Komponen SMAW	13
C. Baja Karbon	19
1. Baja SS400	21

D. <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ).....	23
E. Tegangan Sisa pada Pengelasan.....	25
F. <i>Post Weld Heat Treatment</i> (PWHT)	26
G. Pendinginan Lambat pada Proses PWHT	28
1. Abu Sekam Padi.....	30
2. Tanah Liat	31
H. Pengujian Kekerasan.....	33
1. Brinell.....	35
2. Vickers	37
3. Rockwell	38
I. Pengujian Impak.....	41
J. Penelitian Relevan.....	45
K. Kerangka Konseptual	49
BAB III METODE PENELITIAN	53
A. Jenis Penelitian.....	53
B. Prosedur Penelitian.....	55
C. Tempat dan Waktu Penelitian	61
D. Komponen Penelitian	61
E. Analisis Data	61
1. Uji ANOVA	63
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	70
A. Data Hasil Pengujian.....	70
1. Data Hasil Pengujian Kekerasan	70
2. Data Hasil Pengujian Impak.....	72
B. Analisis Statistik Data Hasil Penelitian.....	73
1. Uji ANOVA terhadap Nilai Kekerasan.....	73
2. Uji ANOVA terhadap Nilai Impak	84
C. Pembahasan.....	89
1. Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin terhadap Kekerasan	

2. Analisis Pengaruh Variasi Media Pendingin terhadap Ketangguhan Impak	94
D. Interpretasi Teknik dan Praktik.....	97
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	89
A. Kesimpulan	89
B. Saran.....	90
C. Implikasi.....	91
DAFTAR PUSTAKA	93
DAFTAR LAMPIRAN	97

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Pengelasan <i>Shielded Metal Arc Welding</i>	12
Gambar 2 Mesin las transformator.....	14
Gambar 3 Mesin las <i>rectifier</i>	15
Gambar 4 Mesin las <i>inverter</i>	16
Gambar 5 Kabel elektroda dan kabel massa	17
Gambar 6 <i>Holder</i> dan klem massa	18
Gambar 7 Elektroda las SMAW	18
Gambar 8 <i>Heat Affected Zone</i> (HAZ) pada sambungan las.....	24
Gambar 9 Diagram fasa Fe-C	28
Gambar 10 Karakteristik pengujian kekerasan	34
Gambar 11 Alat uji kekerasan Brinell.....	35
Gambar 12 Indentor piramida berlian Vickers.....	37
Gambar 13 Prinsip pengujian Rockwell	39
Gambar 14 Skema alat pengujian impak	42
Gambar 15 Sketsa yang menunjukkan metode pembebanan dalam pengujian impak pada metode Charpy dan Izod.....	43
Gambar 16 Bentuk spesimen uji impak standar ASTM E 23	44
Gambar 17 Kerangka konseptual penelitian	52
Gambar 18 Kurva temperatur – waktu proses pemanasan, penahanan dan pendinginan pada PWHT	54
Gambar 19 Diagram alur penelitian.....	55
Gambar 20 Dimensi Plat Baja.....	57
Gambar 21 Dimensi <i>root face</i> , sudut kampuh, dan <i>root gap</i>	57
Gambar 22 Desain pengelasan spesimen	58
Gambar 23 Titik pengujian kekerasan pada spesimen.....	62
Gambar 24 Hasil uji normalitas pada kekerasan <i>base metal</i>	74
Gambar 25 Hasil uji normalitas pada HAZ.....	75
Gambar 26 Hasil uji normalitas pada <i>weld metal</i>	75
Gambar 27 Hasil uji homogenitas pada data uji kekerasan	76
Gambar 28 Hasil uji one-way ANOVA pada kekerasan <i>base metal</i>	77
Gambar 29 Hasil uji one-way ANOVA pada kekerasan HAZ	78
Gambar 30 Hasil uji one-way ANOVA pada kekerasan <i>weld metal</i>	78
Gambar 31 Hasil uji Tukey pada data kekerasan HAZ.....	80
Gambar 32 Hasil uji Tukey pada data kekerasan <i>weld metal</i>	80
Gambar 33 hasil uji Independent Sample t-Test pada HAZ	82
Gambar 34 Hasil uji Independent Sample t-Test pada <i>weld metal</i>	82
Gambar 35 Hasil uji Independent Sample t-Test pada HAZ	83
Gambar 36 Hasil uji Independent Sample t-Test pada <i>weld metal</i>	84

Gambar 37 Hasil uji normalitas pada data nilai impak	76
Gambar 38 Hasil Uji homogenitas pada data nilai impak.....	77
Gambar 39 Hasil uji one-way ANOVA pada data nilai impak.....	77
Gambar 40 Data hasil uji Tukey pada data nilai impak	78
Gambar 41 hasil uji Independent Sample t-Test nilai impak media pendingin abu sekam padi dengan udara	88
Gambar 42 Hasil uji Independent Sample t-Test pada nilai impak media pendingin tanah liat dengan udara.....	88
Gambar 43 Spesimen hasil pengujian kekerasan	89
Gambar 44 Perbandingan kekerasan BM, HAZ, dan WM pada variasi media pendingin.....	90
Gambar 45 Spesimen hasil pengujian impak	94
Gambar 46 Perbandingan nilai impak pada variasi media pendingin.....	95

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Jenis baja karbon berdasarkan kandungan karbon.....	20
Tabel 2 Komposisi kimia baja karbon SS400	21
Tabel 3 Skala kekerasan, beban utama, dan jenis indentor pada pengujian Rockwell	40
Tabel 4 Rancangan Acak Lengkap Perlakuan Media Pendingin PWHT.....	53
Tabel 5 Format tabulasi data uji kekerasan Rockwell B (HRB).....	63
Tabel 6 Format tabulasi data uji impak Charpy	63
Tabel 7 Data hasil pengujian kekerasan pada setiap zona	70
Tabel 8 Nilai kekerasan representatif zona BM dan HAZ (rata-rata titik uji) serta WM pada setiap spesimen	71
Tabel 9 Data hasil pengujian impak pada variasi media pendingin.....	72

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Letter of Acceptance</i> (LoA)	107
Lampiran 2 Kampuh pada <i>base material</i> baja SS400	108
Lampiran 3 Proses pengelasan SMAW	108
Lampiran 4 Spesimen hasil pengelasan	108
Lampiran 5 Pemotongan spesimen	109
Lampiran 6 Penempatan spesimen di dalam <i>furnace</i>	109
Lampiran 7 Media pendingin abu sekam padi dan bubuk tanah liat	109
Lampiran 8 Pembagian spesimen setelah proses pendinginan	110
Lampiran 9 Proses pengujian kekerasan	110
Lampiran 10 Proses pengujian impak	110
Lampiran 11 Lembar konsultasi tugas akhir	111

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Pengelasan merupakan salah satu teknik penyambungan logam yang luas digunakan dalam berbagai sektor industri seperti konstruksi, manufaktur, permesinan, dan industri berat lainnya karena kemampuannya menghasilkan sambungan yang kuat dan permanen. Salah satu metode yang umum dipilih adalah *Shielded Metal Arc Welding* (SMAW). Metode SMAW fleksibel, mudah diaplikasikan di lapangan, serta sesuai untuk pengelasan baja karbon rendah seperti SS400 (Azis & Saputro, 2019).

Baja SS400 merupakan baja karbon rendah yang banyak digunakan sebagai material struktural dan dianggap mudah dilas. Namun, proses pengelasan pada SS400 tetap menimbulkan perubahan struktur mikro dan tegangan sisa (*residual stress*) yang dapat memengaruhi sifat mekanik material, seperti yang ditunjukkan oleh perubahan kekerasan setelah pengelasan (Ramadhani et al., 2022). Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa variasi parameter pengelasan mengakibatkan perubahan nilai energi impak dan sifat struktural pada sambungan las baja SS400 (Kusminah et al., 2024).

Menurut (Lancaster, 1980), proses pengelasan melibatkan pemanasan lokal hingga suhu tinggi yang diikuti oleh pendinginan tidak seragam, sehingga menghasilkan gradien suhu besar yang memicu terbentuknya tegangan sisa serta perubahan fase mikrostruktur pada daerah las dan *Heat*

Affected Zone (HAZ). Fenomena ini didukung oleh hasil penelitian (Jiang et al., 2021) yang menunjukkan bahwa variasi siklus termal pengelasan berpengaruh nyata terhadap distribusi tegangan sisa dan mikrostruktur material. Pada pengelasan baja tahan karat 304, peningkatan heat input dari 4,20 kJ/cm menjadi 5,60 kJ/cm menurunkan tegangan sisa transversal maksimum dari sekitar 220 MPa menjadi 196 MPa pada daerah las dan HAZ. Selain itu, kandungan δ -ferrit juga menurun dari 17,77% menjadi 16,27%, yang menunjukkan perubahan mikrostruktur akibat perbedaan laju pendinginan. Hal ini menegaskan bahwa gradien suhu dan kondisi pendinginan berperan penting dalam menentukan sifat mekanik dan umur pakai sambungan las.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut, salah satu metode yang umum digunakan adalah *Post Weld Heat Treatment* (PWHT). PWHT merupakan perlakuan panas yang dilakukan setelah proses pengelasan dengan tujuan untuk mereduksi tegangan sisa, menstabilkan struktur mikro, serta memperbaiki sifat mekanik sambungan las. PWHT dinyatakan sangat penting terutama pada baja karbon dan baja paduan karena mampu meningkatkan keandalan dan keamanan komponen hasil pengelasan (Jeffus, 2012).

Dalam praktik industri, PWHT banyak diterapkan pada komponen bertekanan seperti *pressure vessels*, pipa penyalur fluida, serta *boiler* yang bekerja pada kondisi beban dan temperatur tinggi. Studi tentang efek PWHT pada baja tekanan menunjukkan bahwa perlakuan panas ini efektif mengurangi tegangan sisa dan memperbaiki sifat mekanik sambungan las

pada material yang digunakan pada *pressure vessel steels*, sehingga meningkatkan kinerja jangka panjang peralatan (Kalyankar & Chudasama, 2018). Selain itu, pada sambungan las *tube to tube-sheet boiler*, pengaplikasian PWHT secara eksperimen mampu menurunkan puncak tegangan sisa hingga sekitar 75 %, yang penting untuk menjaga integritas struktural dan umur layanan *boiler* industri (Jiang et al., 2021). Ulasan literatur juga menunjukkan bahwa PWHT secara konsisten dianggap sebagai metode efektif dalam mereduksi residual stress dan menstabilkan mikrostruktur pada pipa las industri migas dan petrokimia, mendukung keamanan dan keandalan operasi sistem perpipaan (Roslan et al., 2024).

Pada baja karbon rendah seperti SS400, PWHT umumnya dilakukan pada rentang suhu tertentu yang berada di bawah suhu transformasi fasa (di bawah A1) untuk menghindari terjadinya perubahan fasa austenit secara signifikan (Kou, 2003). Tujuan utamanya adalah untuk menghilangkan tegangan sisa tanpa menyebabkan perubahan fasa yang signifikan. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa variasi suhu PWHT dapat memberikan pengaruh yang berbeda terhadap nilai kekerasan, ketangguhan impak, serta struktur mikro hasil las.

Peningkatan suhu PWHT pada hasil las SMAW baja karbon dilaporkan mampu menurunkan nilai kekerasan di daerah *Heat Affected Zone* (HAZ) dan logam las, sekaligus meningkatkan keuletan material. (Nasra et al., 2020) melaporkan bahwa kenaikan suhu PWHT dari 550 °C ke 650 °C menurunkan kekerasan HAZ dari sekitar 240 HV menjadi 190 HV, serta

kekerasan logam las dari sekitar 230 HV menjadi 185 HV. Pada kondisi yang sama, energi serap impact meningkat sekitar 20–30% dibandingkan tanpa PWHT. Perubahan ini terjadi akibat relaksasi tegangan sisa dan homogenisasi struktur mikro. Hasil serupa juga dilaporkan oleh (Mansjur & Suharto, 2024), yang menyatakan bahwa variasi suhu PWHT berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanik dan struktur mikro, khususnya dalam menurunkan kekerasan dan meningkatkan deformasi plastis material.

Selain suhu PWHT, laju pendinginan setelah PWHT juga merupakan faktor penting yang memengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro hasil las. Penelitian (Roslan et al., 2024) pada baja ST37 hasil las SMAW menunjukkan bahwa pendinginan yang lebih lambat setelah PWHT menghasilkan energi impact tertinggi sebesar 1,095 J/mm², sedangkan pendinginan yang lebih cepat menggunakan *vegetable oil* dan *mineral oil* menurunkan energi impact masing-masing menjadi 0,788 J/mm² dan 0,905 J/mm². Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan laju pendinginan cenderung menurunkan ketangguhan material akibat terbentuknya struktur mikro yang lebih keras dan getas. Temuan tersebut sejalan dengan penelitian (Song et al., 2024) yang melaporkan bahwa pendinginan lambat setelah perlakuan panas menghasilkan struktur mikro yang lebih stabil dan ulet, sedangkan pendinginan cepat meningkatkan kekerasan namun berisiko meningkatkan kerapuhan. Oleh karena itu, pemilihan media pendinginan setelah PWHT menjadi aspek krusial dalam mengontrol sifat akhir material sambungan las.

Beberapa penelitian terdahulu telah mengkaji penggunaan berbagai media pendinginan setelah PWHT, seperti air, oli, udara, maupun media padat tertentu. (Arrochman & Rasyid, 2024) meneliti pengaruh variasi media pendinginan setelah PWHT terhadap sifat mekanik dan struktur mikro baja karbon ST37 hasil pengelasan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perbedaan laju pendinginan memberikan pengaruh nyata terhadap nilai kekerasan dan keuletan material. Pendinginan menggunakan media air sebagai pendinginan tercepat menghasilkan nilai kekerasan tertinggi di daerah HAZ dan logam las, dengan nilai kekerasan rata-rata mencapai sekitar 230–240 HV. Sebaliknya, pendinginan menggunakan media oli menunjukkan nilai kekerasan yang lebih rendah, yaitu sekitar 200–210 HV, sedangkan pendinginan udara sebagai media pendinginan paling lambat menghasilkan nilai kekerasan terendah, yakni sekitar 180–190 HV. Penurunan kekerasan tersebut diikuti oleh peningkatan keuletan material, yang ditunjukkan oleh struktur mikro yang lebih homogen dan dominasi fase ferit–perlit yang lebih kasar pada spesimen dengan pendinginan lambat. Hasil ini menegaskan bahwa media pendinginan dengan laju pendinginan lebih rendah cenderung menurunkan kekerasan sekaligus meningkatkan keuletan material baja karbon setelah proses PWHT.

Dalam konteks pendinginan lambat, penggunaan media udara sering direkomendasikan karena memberikan laju pendinginan yang relatif seragam dan tidak ekstrem. Pendinginan udara setelah PWHT memungkinkan terjadinya relaksasi tegangan secara bertahap, sehingga mengurangi risiko

terbentuknya tegangan termal baru. Pendinginan lambat pasca PWHT ditegaskan berperan penting dalam menurunkan *residual stress* dan meningkatkan ketangguhan sambungan las (Falodun et al., 2025).

Namun demikian, kajian yang secara spesifik berfokus pada penggunaan dan perbandingan media pendinginan lambat pasca PWHT masih relatif terbatas, khususnya pada hasil las SMAW baja struktural SS400. Sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan media pendinginan dengan laju pendinginan lebih lambat dibandingkan air, seperti oli atau pasir, dengan fokus utama pada pengaruh suhu PWHT atau pada material baja dengan spesifikasi yang berbeda. Padahal, karakteristik laju pendinginan oli masih relatif lebih cepat dibandingkan media padat yang bersifat isolatif. Akibatnya, kajian mengenai media pendinginan lambat alternatif yang mampu menghasilkan laju pendinginan yang lebih terkendali dan seragam masih belum banyak dilakukan.

Beberapa penelitian menunjukkan bahwa karakteristik media pendinginan padat pasca PWHT memberikan pengaruh nyata terhadap sifat mekanik hasil las. (Wahyunanta & Drastiawati, 2023) mengkaji penggunaan beberapa jenis pasir sebagai media pendinginan lambat, yaitu pasir sungai, pasir pantai, dan pasir silika, pada proses PWHT hasil las SMAW baja SS400. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pasir sungai menghasilkan nilai kekerasan paling rendah dibandingkan pasir pantai dan pasir silika, baik pada daerah *weld metal*, HAZ, maupun *base metal*. Pada kondisi PWHT suhu 900 °C dengan holding time 10 menit, nilai kekerasan pada spesimen dengan

pendinginan pasir sungai tercatat masing-masing sebesar 98,3 HRB (*weld metal*), 97,1 HRB (*HAZ*), dan 95,4 HRB (*base metal*). Perbedaan ini dikaitkan dengan karakteristik isolasi termal dan ukuran butir pasir yang memengaruhi laju pelepasan panas, sehingga pendinginan berlangsung lebih lambat dan stabil, yang pada akhirnya mendukung relaksasi tegangan sisa serta peningkatan keuletan material.

Abu sekam padi merupakan material hasil pembakaran sekam padi yang memiliki struktur berpori dengan kandungan silika yang relatif tinggi. Karakteristik ini membuatnya memiliki kemampuan dalam menyerap dan menahan panas, sehingga proses perpindahan panas berlangsung lebih lambat dibandingkan material padat konvensional (Kalapathy et al., 2002). Sementara itu, tanah liat merupakan material alami yang memiliki sifat termal stabil serta kemampuan menyimpan panas yang cukup baik, sehingga dapat mempertahankan suhu dalam jangka waktu tertentu sebelum dilepaskan secara bertahap ke lingkungan (Murray, 2007). Kedua material ini secara umum dikenal memiliki sifat isolasi termal yang cukup baik dalam aplikasi yang berkaitan dengan pengendalian panas.

Pada penelitian ini, abu sekam padi dan bubuk tanah liat digunakan sebagai media pendinginan lambat pasca PWHT pada baja SS400 hasil las SMAW. Pemilihan kedua media tersebut didasarkan pada karakteristik termalnya yang diharapkan mampu mengendalikan laju pelepasan panas secara lebih bertahap dan stabil dibandingkan pendinginan udara. Dengan kondisi tersebut, proses perubahan struktur mikro dan relaksasi tegangan sisa

diharapkan dapat berlangsung lebih optimal, sehingga berpengaruh terhadap peningkatan kualitas sifat mekanik sambungan las. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan media pendinginan alternatif serta menjadi acuan aplikatif dalam peningkatan kualitas hasil pengelasan di industri.

B. Identifikasi masalah

Berdasarkan uraian latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya, beberapa permasalahan yang dapat diidentifikasi adalah:

1. Proses pengelasan SMAW pada baja SS400 menyebabkan terjadinya pemanasan lokal yang tinggi dan pendinginan tidak seragam, sehingga menimbulkan gradien suhu besar antara daerah logam las, HAZ, dan logam induk.
2. Gradien suhu yang besar selama dan setelah proses pengelasan mengakibatkan terbentuknya tegangan sisa pada sambungan las, yang berpotensi menurunkan ketangguhan dan meningkatkan risiko keretakan pada daerah HAZ.
3. Perubahan struktur mikro akibat siklus termal pengelasan menyebabkan peningkatan kekerasan lokal pada daerah las dan HAZ, yang diikuti dengan penurunan keuletan material.
4. Pentingnya pemilihan media pendingin pada proses PWHT serta pengkajian media pendingin alternatif selain media konvensional, dan pengaruhnya terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impak hasil pengelasan SMAW.

C. Batasan masalah

Pada penelitian ini perlu adanya batasan masalah agar pembahasan lebih terarah. Adapun batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut.

1. Penelitian dibatasi pada kajian pengaruh media pendingin alternatif pada proses PWHT terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impak hasil pengelasan SMAW pada baja SS400.
2. Media pendingin alternatif yang digunakan meliputi abu sekam padi dan bubuk tanah liat. Udara digunakan sebagai media pendingin konvensional yang berfungsi sebagai pembanding terhadap efektivitas media alternatif tersebut.

D. Rumusan masalah

Berdasarkan batasan masalah yang telah diuraikan di atas, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pengaruh penggunaan media pendingin abu sekam padi dan bubuk tanah liat pada proses PWHT terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impak hasil las SMAW pada baja SS400.

E. Tujuan penelitian

Adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh penggunaan media pendingin abu sekam padi dan bubuk tanah liat pada proses PWHT terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impak hasil las SMAW pada baja SS400.

F. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian adalah sebagai berikut.

1. Menambah referensi ilmiah mengenai pengaruh penggunaan media pendinginan lambat berupa abu sekam padi dan bubuk tanah liat pada proses PWHT terhadap nilai kekerasan dan ketangguhan impak hasil las SMAW pada baja SS400.
2. Memberikan acuan bagi penelitian selanjutnya dalam upaya pengendalian tegangan sisa serta optimasi parameter proses PWHT pada pengelasan baja karbon.
3. Menyediakan alternatif media pendinginan lambat yang ekonomis dan ramah lingkungan, khususnya abu sekam padi dan bubuk tanah liat, yang berpotensi diterapkan dalam proses PWHT pada industri pengelasan.

BAB V

PENUTUP

A. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut.

1. Variasi media pendingin setelah PWHT pada suhu 600°C memberikan pengaruh terhadap nilai kekerasan hasil las SMAW pada baja SS400. Hal ini terlihat dari hasil pengujian yang menunjukkan bahwa pendinginan udara menghasilkan nilai kekerasan tertinggi, yaitu mencapai 75,28 HRB pada *base metal*, 77,47 HRB pada HAZ, dan 80,10 HRB pada *weld metal*. Sementara itu, media abu sekam padi menghasilkan nilai kekerasan pada kisaran 75,05 HRB (*base metal*), 76,40 HRB (HAZ), dan 77,43 HRB (*weld metal*), sedangkan media tanah liat berada pada nilai 74,68 HRB (*base metal*), 74,98 HRB (HAZ), dan 76,63 HRB (*weld metal*). Perbedaan ini menunjukkan bahwa semakin cepat laju pendinginan, seperti pada udara, nilai kekerasan yang dihasilkan cenderung lebih tinggi dibandingkan media pendingin padat.
2. Perbedaan media pendingin juga memengaruhi nilai ketangguhan impak hasil las SMAW. Nilai tertinggi diperoleh pada media tanah liat sebesar 1,175 J/mm², diikuti abu sekam padi sebesar 1,107 J/mm², sedangkan nilai terendah terdapat pada pendinginan udara sebesar 0,845 J/mm². Hal ini menunjukkan bahwa laju pendinginan yang lebih lambat cenderung meningkatkan kemampuan material dalam menyerap energi kejut.

3. Terdapat kecenderungan hubungan terbalik antara kekerasan dan ketangguhan impak. Kondisi ini terlihat pada pendinginan udara yang menghasilkan kekerasan tertinggi (80,10 HRB) namun ketangguhan impak terendah ($0,845 \text{ J/mm}^2$), sedangkan media tanah liat menunjukkan ketangguhan tertinggi dengan nilai kekerasan yang lebih rendah.
4. Perbedaan respons sifat mekanik tersebut dipengaruhi oleh karakteristik media pendingin setelah PWHT. Media yang bersifat lebih isolatif seperti abu sekam padi dan tanah liat memperlambat pelepasan panas sehingga struktur yang terbentuk lebih stabil dan ketangguhan meningkat, sedangkan pendinginan udara yang lebih cepat menghasilkan peningkatan kekerasan namun menurunkan ketangguhan impak.

B. Saran

Adapun saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian serta pengujian yaitu.

1. Dalam penerapan di industri pengelasan, terutama pada komponen baja karbon rendah yang membutuhkan ketahanan terhadap beban kejut, penggunaan media pendingin seperti tanah liat atau abu sekam padi setelah PWHT dapat dipertimbangkan karena memberikan ketangguhan impak yang lebih baik dibandingkan pendinginan udara.
2. Untuk kebutuhan yang lebih mengutamakan kekerasan permukaan, pendinginan udara masih dapat digunakan, namun perlu diperhatikan adanya penurunan ketangguhan impak yang cukup signifikan sehingga tidak semua aplikasi cocok menggunakan kondisi tersebut.

3. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan variasi temperatur PWHT yang berbeda atau kombinasi media pendingin lain untuk memperoleh pemahaman yang lebih luas mengenai pengaruh pengendalian laju pendinginan terhadap sifat mekanik material.
4. Disarankan dilakukan pengujian struktur mikro secara lebih mendalam untuk memperkuat analisis hubungan antara perubahan mikrostruktur dengan nilai kekerasan dan ketangguhan impak yang dihasilkan.

C. Implikasi

Hasil penelitian ini memberikan implikasi teknis bahwa pengendalian laju pendinginan setelah PWHT merupakan faktor penting dalam menentukan keseimbangan sifat mekanik hasil las SMAW pada baja SS400. Perbedaan media pendingin terbukti tidak hanya memengaruhi nilai kekerasan, tetapi juga ketangguhan impak, sehingga pemilihan media pendingin dapat digunakan sebagai salah satu parameter pengendalian kualitas hasil pengelasan.

Secara praktis, penggunaan media pendingin yang lebih lambat seperti abu sekam padi dan tanah liat dapat diterapkan pada komponen yang memerlukan ketangguhan tinggi dan ketahanan terhadap beban kejut. Sementara itu, pendinginan udara lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan kekerasan lebih tinggi, dengan konsekuensi penurunan ketangguhan yang perlu diperhitungkan dalam desain.

Selain itu, hasil penelitian ini dapat menjadi acuan awal dalam pengembangan metode PWHT berbasis media alternatif yang lebih sederhana

dan ekonomis, terutama pada lingkungan industri kecil atau bengkel fabrikasi yang tidak memiliki sistem pendinginan terkontrol secara modern.

DAFTAR PUSTAKA

- Arrochman, A. F., & Rasyid, A. H. A. (2024). Pengaruh Variasi Media Pendingin Setelah PWHT Pengelasan SMAW Baja ST37 Terhadap Ketangguhan Dan Struktur Mikro. *Jtm*, 13(02), 75–82. <https://doi.org/10.26740/jtm.v13n02.p75-82>
- ASM International. (1990). *ASM Handbook, Volume 1: Properties and Selection—Irons, Steels, and High-Performance Alloys* (ASM International (ed.); Vol. 1). ASM International. <http://books.google.com.hk/books?id=eC-Zt1J4oCgC>
- ASME. (2025). *ASME Boiler and Pressure Vessel Code (BPVC), Section VIII Division 1: Rules for Construction of Pressure Vessels*. American Society of Mechanical Engineers. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511978371.010>
- Avner, S. H. (1974). *Introduction To Physical Metallurgy Second Edition*. McGraw-Hill Book Company.
- Azis, R. A., & Saputro, H. (2019). Pengaruh Variasi Diameter Elektroda E7018 Terhadap Kekuatan Tarik , Kekerasan , dan Struktur Mikro Pengelasan pada Baja Karbon Rendah Jenis SS400 dengan Metode SMAW. *JURNAL TEKNIK*, 17(2), 94–105.
- Bao, J. (2019). *Rice: Chemistry and Technology*. AACC International Press. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-01526-7>
- BSI. (2018). *PD 5500: Specification for Unfired Pressure Vessels*. British Standards Institution.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Material Science and Engineering: An Introduction (9th ed.)*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1201/9781439887493-6>
- Cary, H. B. (1989). *Modern Welding Technology 4th ed.* (Vol. 31, Issue 4). Prentice Hall. <https://doi.org/10.1108/ir.2004.31.4.376.3>
- CEN. (2014). *EN 13445: Unfired Pressure Vessels*. European Committee for Standardization.
- Dieter, G. E. (1961). *Metallurgy and Metallurgical Engineering Series*. McGraw-Hill Book Company.
- Falodun, O., Oke, S., & Bodunrin, M. (2025). A comprehensive review of residual stresses in carbon steel welding: formation mechanisms, mitigation strategies,

- and advanced post-weld heat treatment techniques. In *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (Vol. 136, Issue 10, pp. 4107–4140). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15088-8>
- Grim, R. E. (1953). *Clay Mineralogy (1st ed.)*. McGraw-Hill Book Company. <https://doi.org/10.1126/science.135.3507.890>
- Hutabarat, S. M. (2025). *Studi Perbandingan Media Quenching pada Baja Karbon Sedang AISI 1045 dan Baja Karbon Rendah SS400 Hasil Pengelasan GMAW Terhadap Sifat Mekanik*. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
- Japanese Industrial Standard Committee. (2010). *JIS G3101: Rolled steels for general structure*.
- Jeffus, L. (2012). *Welding and Metal Fabrication*. Delmar.
- Jiang, W., Luo, Y., Zeng, Q., Wang, J., & Tu, S. T. (2021). Residual stresses evolution during strip clad welding, post welding heat treatment and repair welding for a large pressure vessel. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 189, 104259. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2020.104259>
- Kalapathy, U., Proctor, A., & Shultz, J. (2002). A Simple Method for Production of Pure Silica from Rice Hull Ash. *Bioresource Technology*, 85(3), 285–289. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00116-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00116-5)
- Kalyankar, V. D., & Chudasama, G. (2018). Effect of post weld heat treatment on mechanical properties of pressure vessel steels. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 24675–24684. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.265>
- Kou, S. (2003). *Welding Metallurgy (2nd ed.)*. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/0471434027>
- Kusminah, I. L., Anggara, D., Wardani, D., Widodo, E. W. R., Nafi, M., Handoko, L., Djati, A. L., & Trianto, R. A. (2024). Analysis of the Effect of PWHT on the Corrosion Test of API 5L X65 Material in Submerged Arc Welding. *Journal of Mechanical Engineering, Science, and Innovation*, 4(2), 122–132. <https://doi.org/10.31284/j.jmesi.2024.v4i2.6556>
- Lancaster, J. F. (1980). *Metallurgy of Welding (3rd ed.)*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-94-010-9506-8>
- Mansjur, Z., & Suharto, M. F. (2024). Pengaruh Media Pendingin Post–Weld Heat Treatment (PWHT) Terhadap Karakteristik Mekanik dan Struktur Mikro

- Baja Karbon Hasil Pengelasan Shielded Metal Arc Welding (SMAW). *Jurnal Mesin Nusantara*, 7(1), 126–137. <https://doi.org/10.29407/jmn.v7i1.22434>
- Matien, Y. A. (2016). Pengaruh Media Pendingin Terhadap Struktur Mikro, Kekerasan dan Laju Korosi Pada Hardening Baja Karbon Sedang. *Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang*, 126–137.
- Messler, R. W. (2004). Joining composite materials and structures: Some thought-provoking possibilities. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 17(1), 51–75. <https://doi.org/10.1177/0892705704033336>
- Murray, H. H. (2007). *Applied Clay Mineralogy: Occurrences, Processing and Applications of Kaolins, Bentonites, Palygorskite–Sepiolite, and Common Clays*. Elsevier.
- Nasra, K. A., Zuldesmi, & Kewas, J. C. (2020). Pengaruh Post Weld Heat Treatment Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Baja Karbon ST42 dengan Pengelasan SMAW (Shielded Metal Arc Welding). *ACTUATOR: Jurnal Teknik ...*, 1(1), 26–36. <http://ejurnal-mapalus-unima.ac.id/index.php/actuator/article/view/115>
- Prasmana, A. (2023). *Analisis Pengaruh Post Weld Heat Treatment (PWHT) Metode Q-P-T terhadap Sifat Mekanik Baja SS400*. Universitas Panca Marga.
- Rajab, D. A., Artitana, L., & Suprayitno, A. (2023). Analysis of Smaw in Different Materials With Electrode Variations. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 8(2), 113–125. <https://doi.org/10.21831/dinamika.v8i2.64465>
- Ramadhani, S., Basyirun, B., Rusiyanto, R., & Sunyoto, S. (2022). Pengaruh Variasi Temperatur Preheat Pada Pengelasan Smaw Terhadap Struktur Mikro Dan Kekerasan Baja Karbon SS400. *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin*, 7(1), 12–20. <https://doi.org/10.21831/dinamika.v7i1.46929>
- Roslan, N. S., Hadzir, M. M., Ismail, I. F., Mat, M. N. H., & Yusup, E. M. (2024). A Review on The Effect of Post-Weld Heat Treatment (PWHT) on Its Thermal Analysis and Mechanical Properties of Welded Metallic Pipe. *International Journal of Integrated Engineering*, 16(2), 296–313. <https://doi.org/10.30880/ijie.2024.16.02.031>
- Saputra, D. A., Kosjoko, & Syam PN, A. F. (2022). Pengaruh Kuat Arus Listrik Pada Pengelasan SMAW Penyambungan Pipa Baja Karbon ASTM 53 Grade B Terhadap Tensile Stranght The Effect OF Strong Electricity On SMAW Welding ASTM 53 Grade B Carbon Steel Pipe Connection On Tensile Stanght. *Jurnal Smart Teknologi*, 3(5), 2774–1702. <http://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST>

- Saragi, J. F. H., Bahri Pratama, A., Boangmanalu, E. P. D., Qadry, A., & Sinaga, F. T. H. (2023). Pengaruh Temperatur terhadap Kekuatan Impak pada Material Besi Nako 10 mm. *Jurnal Mesil (Mesin Elektro Sipil)*, 04(01), 45–51. <https://ceredindonesia.or.id/index.php/mesil>
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2010). *Foundations of Materials Science and Engineering* (Vol. 72953586). McGraw-Hill Book Company.
- Song, T., Wang, Z., Bao, Y., Gu, C., & Zhang, Z. (2024). Effect of Silicon–Manganese Deoxidation on Oxygen Content and Inclusions in Molten Steel. *Processes*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/pr12040767>
- Soy, U., Iyibilgin, O., Findik, F., Oz, C., & Kiyan, Y. (2011). Determination of welding parameters for shielded metal arc welding. *Scientific Research and Essays*, 6(15), 3153–3160. <https://doi.org/10.5897/SRE10.1073>
- Sugihrahma, G. ramadhan. (2020). Pengaruh Arus Pengelasan Shield Metal Arc Welding dengan Elektroda E7018 pada Baja Karbon Rendah. *Journal of Mechanical Engineering Manufactures Materials and Energy*, 4(2), 197–207. <https://doi.org/10.31289/jmemme.v4i2.4091>
- Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment Handbook*. CRC Press.
- Wahyunanta, C., & Drastiawati, N. S. (2023). Pengaruh Variasi Media dalam Proses PWHT Pengelasan SMAW untuk Material Baja SS400 terhadap Nilai Kekerasan dan Kekuatan Tarik. *Jurnal Teknik Mesin*, 11(1), 13–18.
- Wirjosumarto, H., & Okumura, T. (2000). *Teknologi Pengelasan Logam* (Vol. 8). PT Pradnya Paramita.
- Withers, P. J., & Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Residual stress Part 1 – Measurement techniques. *Materials Science and Technology*, 17(April), 355–365.